

DOI: 10.11686/cyxb2025198

http://cyxb.magtech.com.cn

马婧娟, 李希来, 尹通江, 等. 高寒草甸退化斑块恢复演替对土壤持水能力的影响. 草业学报, 2026, 35(4): 14—28.

MA Jing-juan, LI Xi-lai, YIN Tong-jiang, *et al.* Effects of recovery succession of degraded patches on soil water holding capacity in an alpine meadow. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 14—28.

## 高寒草甸退化斑块恢复演替对土壤持水能力的影响

马婧娟<sup>1,2</sup>, 李希来<sup>1,2\*</sup>, 尹通江<sup>2</sup>, 鲍玉英<sup>1,2</sup>, 张玉芳<sup>1,2</sup>, 丁北桥<sup>1,2</sup>, 袁颖<sup>1,2</sup>

(1. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为探讨不同立地条件下斑块化退化高寒草甸在自然恢复演替过程中土壤持水能力的变化规律,本研究以黄河源区斑块化退化高寒草甸为对象,选择滩地和坡地2种立地条件,将退化高寒草甸按照植被状况划分为裸露斑块(BP)、短期恢复斑块(SRP)、长期恢复斑块(LRP)、健康高寒草甸(HAM)4种不同的恢复演替阶段,基于野外样方调查和室内试验,分析土壤持水量、孔隙度、容重、有机碳以及植物地上和地下生物量的变化规律,并探讨其相关性,揭示不同恢复演替阶段土壤持水能力的差异。结果表明,滩地和坡地斑块化退化高寒草甸裸露斑块在不同恢复演替阶段土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、总孔隙度、有机碳以及植物地上和地下生物量均逐渐增加,而土壤容重和非毛管孔隙度均逐渐减少。另外,滩地不同恢复演替阶段土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、总孔隙度、有机碳以及植物地上和地下生物量均高于坡地,而土壤容重和非毛管孔隙度均低于坡地。相关性分析结果表明,滩地和坡地土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均分别与土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度以及植物地上和地下生物量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),而均分别与土壤容重和非毛管孔隙度呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );另外,滩地和坡地的土壤容重与非毛管孔隙度呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),两者分别与土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度以及植物地上和地下生物量呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ),而土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度以及植物地上和地下生物量两两之间分别呈显著正相关关系( $P < 0.05$ )。总之,斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替促进了土壤的持水能力,提高了土壤的水源涵养功能。

**关键词:**土壤持水能力;滩地;坡地;斑块化退化;高寒草甸;恢复演替;相关性分析

## Effects of recovery succession of degraded patches on soil water holding capacity in an alpine meadow

MA Jing-juan<sup>1,2</sup>, LI Xi-lai<sup>1,2\*</sup>, YIN Tong-jiang<sup>2</sup>, BAO Yu-ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-fang<sup>1,2</sup>, DING Bei-qiao<sup>1,2</sup>, YUAN Ying<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China

**Abstract:** This research investigated recovery processes in a patchy degraded alpine meadow in the source region of the Yellow River. Variation in soil water holding capacity and related parameters during natural recovery and succession of the studied alpine meadow was evaluated for two site categories, low-lying and sloping grassland. For both site categories, the degraded alpine meadow was divided into four recovery and succession stages defined by vegetation conditions: bare patch (BP), short-term recovered patch (SRP), long-term recovered patch (LRP), and

收稿日期: 2025-05-19; 改回日期: 2025-08-08

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U23A20159, U21A20191), 青海省科学技术厅项目(2023-QY-210)和高等学校学科创新引智计划项目(D18013)资助。

作者简介: 马婧娟(1997—), 女, 甘肃天水人, 在读硕士。E-mail: mjingjuan@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xilai-li@163.com

healthy alpine meadow (HAM). Both a field quadrat survey and an indoor experiment were conducted to ascertain the variation in soil water holding capacity, porosity, bulk density, organic carbon, and aboveground and underground biomass of plants. To reveal how soil water holding capacity varied at different recovery or succession stages, the correlations between these variables are explored. The results show that saturated soil water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, capillary porosity, total porosity, organic carbon and aboveground and underground biomass of plants in the bare patches of the degraded alpine meadow increased gradually with the recovery succession stage, while soil bulk density and non-capillary porosity decreased gradually. In addition, the low-lying grassland had higher soil saturated water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, capillary porosity, total porosity, organic carbon, aboveground and underground biomass of plants than the sloping grassland at all recovery succession stages, while soil bulk density and non-capillary porosity were lower than those in sloping grassland. Furthermore, soil saturated water holding capacity, capillary water holding capacity and field water holding capacity of low-lying and sloping grassland were significantly positively correlated with soil organic carbon, capillary porosity, total porosity and aboveground and underground biomass of plants ( $P < 0.05$ ), and were significantly negatively correlated with soil bulk density and non-capillary porosity ( $P < 0.05$ ). In addition, there was a significant positive correlation between soil bulk density and non-capillary porosity of both the low-lying and sloping grassland sites ( $P < 0.05$ ), and a significant negative correlation between soil bulk density and soil organic carbon, capillary porosity, total porosity, and aboveground and underground biomass of plants ( $P < 0.05$ ). There was a significant positive correlation between soil organic carbon, capillary porosity, total porosity, and aboveground and underground biomass of plants ( $P < 0.05$ ). In short, the natural recovery succession of the patchily degraded alpine meadow promoted soil water holding capacity and improved the water conservation function of soil.

**Key words:** soil water holding capacity; low-lying grassland; sloping grassland; patchy degradation; alpine meadow; recovery succession; correlation analysis

土壤持水能力是土壤关键的物理性质之一,作为评价土壤水分调节能力和涵养水源的重要指标,其对植物群落的恢复和重建有着不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。土壤持水能力的特征可通过其对水分的吸收和保持能力来体现,土壤吸收的水分主要被植物根系吸收,用于维持植物的蒸腾作用和生长发育,而土壤滞留的水分储存在非毛管孔内,可在需要时补充被吸收的水分<sup>[3]</sup>。土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均能直观地反映土壤持水能力,同时间接地反映土壤水分的再分配能力,并对枯落物分解与土壤表层的物质和能量循环产生重要影响<sup>[4]</sup>。土壤水分动态复杂,受气象、地形、植被覆盖和土壤特性等因素的影响,尤其是土壤有机碳、根系分布和土壤结构通过改变土壤水文过程影响土壤水分的垂直运动,并且水分蒸散发、植物吸收、土壤表面入渗和降水等过程也会影响土壤水分的再分配过程<sup>[5]</sup>。土壤水分作为调节植物群落的主要影响因子,在长期的植被恢复和重建过程中会影响植物群落的结构以及复杂程度<sup>[6]</sup>。因此,探究土壤特性及水源涵养问题已经成为国内外学者研究的热点话题<sup>[7]</sup>。

高寒草甸由于受高原鼠兔种群暴发以及人类放牧活动的干扰影响,导致其产生了大面积的退化斑块,土壤的持水能力显著下降<sup>[8-10]</sup>。健康的高寒草甸可以借助生态系统的自然恢复力来维持表层的土壤水分,促使土壤表层有机碳和水稳性团聚体的积累,改善土壤的水热环境,从而提高土壤的固碳持水能力<sup>[11]</sup>。在防控高原鼠兔种群暴发前提下斑块化退化高寒草甸植物群落逐渐从裸露斑块过渡演替到短期恢复斑块、长期恢复斑块,并最终恢复为健康的高寒草甸<sup>[12]</sup>。健康高寒草甸和长期恢复斑块表现出比裸露斑块和短期恢复斑块更明显的扩张性,因此说明斑块化退化高寒草甸具有很强的自然恢复力<sup>[13]</sup>。在青藏高原高寒草甸退化斑块自然恢复演替过程中,最关键的限制因子是土壤水分<sup>[14]</sup>。土壤作为高寒草甸的水分传输基质,对水源涵养具有极其重要的作用<sup>[15]</sup>。因此,开展高寒草甸退化斑块恢复演替土壤持水能力的研究十分重要。

近年来,关于高寒草甸土壤持水能力的研究已有报道<sup>[16-18]</sup>,而斑块化退化高寒草甸在自然恢复演替过程中土壤持水能力的变化规律研究鲜有报道。滩地和坡地作为高寒草甸植物生长的2种不同的立地条件,由于受到局部空间水、光、热等资源的再分配影响,从而导致土壤理化性质发生了一定程度的变化<sup>[19]</sup>;另外,由于土壤的水分含量、空间分布、养分含量以及孔隙度状况不同,从而导致土壤结构、水源涵养能力产生差异<sup>[20]</sup>。因此,本研究以黄河源区斑块化退化高寒草甸为研究对象,选择滩地和坡地2种不同的立地条件,将高寒草甸按照植被状况划分为裸露斑块、短期恢复斑块、长期恢复斑块、健康高寒草甸4种不同的恢复演替阶段,采取空间序列代替时间序列的方法,基于土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量等指标的测定,分析斑块化退化高寒草甸在自然恢复演替过程中土壤持水能力的变化规律以及影响因子,从而为斑块化退化高寒草甸在自然恢复演替过程中土壤水源涵养功能的研究提供理论基础与数据支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

本研究区位于青海省河南蒙古族自治县,全县海拔为3600~3800 m,高原大陆性气候特征明显,春秋季节短,四季不分明,无绝对无霜期;每年5—10月温暖、多雨,11月至次年4月寒冷、干燥,多大风天气;年均气温为-1.3~1.6℃,年均降水量为597.1~615.5 mm,土壤类型多为亚高山草甸土<sup>[21]</sup>。河南县克其合滩地形特点是扇形冲积河滩,地势较低,高寒草甸已发生了明显的斑块化退化,植被覆盖度低,高原鼠兔等啮齿动物活动频繁,牧民过度放牧,高寒草甸景观破碎化,出现了大量的裸露斑块<sup>[22-23]</sup>。植被群落总盖度在80%以下,秃斑块面积占比大于20%,高寒草甸优势物种为矮生嵩草(*Carex alatauensis*)和高山嵩草(*Carex parvula*),退化斑块的优势物种为密花香薷(*Elsholtzia densa*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)和西藏微孔草(*Microula tibetica*)<sup>[24-25]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 试验设计** 本试验地设在青海省河南蒙古族自治县克其合滩中度退化的高寒草甸区,滩地样地位于北纬34°41′14",东经101°46′21",海拔为3581 m;坡地样地位于北纬34°41′14",东经101°46′53",海拔为3608 m。2024年7月,在斑块化退化高寒草甸植物的生长旺盛期,分别选择3块100 m×100 m的阳坡滩地和阳坡坡地,各地块之间的距离>200 m(图1)。在每块地内进行不同斑块类型的鉴定,将其分为健康高寒草甸(healthy alpine meadow, HAM)、长期恢复斑块(long-term recovered patch, LRP)、短期恢复斑块(short-term recovered patch, SRP)、裸露斑块(bare patch, BP)这4种恢复演替阶段(表1),然后分别在每块地内进行取样。首先,在每个恢复演替阶段上设置1个50 cm×50 cm的样方框,重复3次,进行植被样方调查,之后齐地面剪去植物地上部分,装入标记好的信封袋中以测定地上生物量;其次,用直径3.6 cm的土钻在样方中心位置钻取土壤表层0~20 cm深度的土样,剔除动植物残体和小石块,在实验室过5 mm筛后将筛出来的根装入自封袋,在流水中清洗、分离出植物根系以测定地下生物量,土样分为两部分,其中一部分于阴凉处风干,过筛后用于测定土壤有机碳等指标,另一部分为鲜土,用于测定其他指标;最后,在0~20 cm土层垂直剖面水平方向用内径为5 cm、容积为100 cm<sup>3</sup>的环刀采集原状土壤样品,取样后环刀迅速装入自带的黑色塑料盒中并封盖,装入标记好的自封袋中,用于测定土壤容重、土壤持水量和土壤孔隙度。将取得的所有样带回实验室,在室内进行相关指标的测定。

**1.2.2 测定指标与方法** 植物地上、地下生物量的测定采用烘干法<sup>[26]</sup>,将带回实验室的植物样在105℃烘箱中杀青30 min后,在65℃下烘至恒重,称重得到植物地上和地下生物量。

采用环刀法和烘干法测定土壤容重<sup>[27]</sup>,采用室内浸泡法<sup>[28]</sup>测定土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度。计算公式如下:

$$\text{土壤容重}(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}, P) = m_5 / 100$$

$$\text{土壤饱和持水量}(\%, D) = (m_1 - m_4) / m_5 \times 100\%$$

$$\text{土壤毛管持水量}(\%, G) = (m_2 - m_4) / m_5 \times 100\%$$

$$\text{土壤田间持水量}(\%, C) = (m_3 - m_4) / m_5 \times 100\%$$

$$\text{土壤毛管孔隙度}(\%, K) = G \times P \times 100\%$$

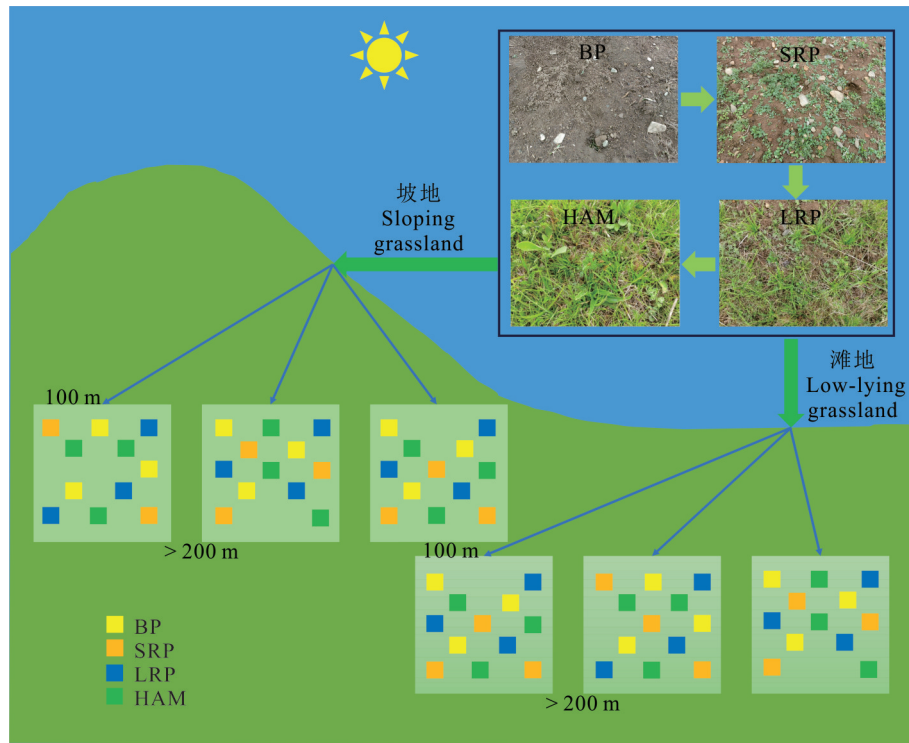


图 1 试验设计和样地分布特征

Fig. 1 Experimental design and distribution characteristics of sampling plots

BP: 裸露斑块 Bare patch; SRP: 短期恢复斑块 Short-term recovered patch; LRP: 长期恢复斑块 Long-term recovered patch; HAM: 健康高寒草甸 Healthy alpine meadow. 下同 The same below.

表 1 斑块化退化高寒草甸不同恢复演替阶段的基本情况概述

Table 1 Summary of basic information of the patchily degraded alpine meadow at four recovery succession stages

演替阶段 Succession stages	演替年限 Years of succession (a)	主要优势种 Main dominant species	基本特征 Basic feature	植被盖度 Vegetation coverage (%)
BP	—	—	土壤裸露疏松、偶有植物生长 Soil exposed loose, occasional plant growth	0
SRP	3~5	密花香薷 <i>E. densa</i> ; 西藏微孔草 <i>M. tibetica</i>	高原鼠兔停止干扰活动, 有少量杂类草定植 Plateau pikas stopped interfering activities, and a small number of forbs were planted	20~40
LRP	>5, <30	黑褐苔草 <i>Carex atrofusca</i>	正在进行自然生态恢复, 还未形成草皮 Natural ecological restoration is underway, and the turf has not yet been formed	50~80
HAM	>30	矮生嵩草 <i>C. alatauensis</i> ; 高山嵩草 <i>C. parvula</i>	没有发生退化的高寒草甸 Alpine meadow without degradation	>90

$$\text{土壤非毛管孔隙度}(\%, F) = (D - G) \times P \times 100\%$$

$$\text{土壤总孔隙度}(\%, Z) = (K + F) \times 100\%$$

式中:  $m_1$  为环刀重+原状土浸泡 24 h 质量;  $m_2$  为环刀+原状土放置在沙子表面 2 h 质量;  $m_3$  为环刀+原状土放置在沙子表面 96 h 质量;  $m_4$  为干土质量+环刀质量;  $m_5$  为干土质量。

称取过 0.25 mm 筛的风干土样, 采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定土壤有机碳的含量<sup>[29]</sup>。

### 1.3 试验数据处理与统计分析

使用 Excel 2016 对试验数据进行整理和预处理。利用 IBM SPSS Statistics 27.0.1 软件对滩地和坡地不同恢复演替阶段的土壤持水量、容重、孔隙度、有机碳和生物量进行单因素方差分析; 并使用 Duncan 检验进行数据均

值间的多重比较,探讨滩地和坡地斑块化退化高寒草甸在恢复演替过程中不同恢复演替阶段土壤持水量、容重、孔隙度、有机碳和生物量的差异显著性;滩地和坡地2种立地条件之间进行两个独立样本  $T$  检验,显著性水平为 0.05,运用 Origin 2024 软件进行绘图以及 Pearson 相关性分析,探讨土壤持水能力与土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、有机碳以及地上和地下生物量的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 滩地和坡地土壤容重、有机碳和地上、地下生物量的变化特征

随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,滩地和坡地 BP 阶段由于土壤裸露疏松少有植物生长,SRP 阶段有少量杂类草定植,LRP 阶段有禾本科、莎草科、豆科植物定植,但还未形成草皮,HAM 阶段大量草甸草皮形成(表 1)。因此,在退化草甸自然恢复演替过程中土壤容重、有机碳和地上、地下生物量均具有显著差异(图 2)。滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤容重均表现为  $BP > SRP > LRP > HAM$ ,且不同恢复演替阶段之间具有显著差异,滩地最小为  $0.76 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,坡地最小为  $0.84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;土壤有机碳均为  $BP < SRP < LRP < HAM$ ,且不同恢复演替阶段之间差异显著,滩地最大为  $64.44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,坡地最大为  $52.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;地上和地下生物量均表现为  $BP < SRP < LRP < HAM$ ,且不同恢复演替阶段之间差异显著。总体来说,斑块化退化高寒草甸在自然恢复演替过程中,滩地和坡地土壤容重均显著降低,而土壤有机碳和地上、地下生物量均显著增加,土壤有机碳和地上、地下生物量均表现为滩地显著高于坡地,而土壤容重表现为滩地显著低于坡地。

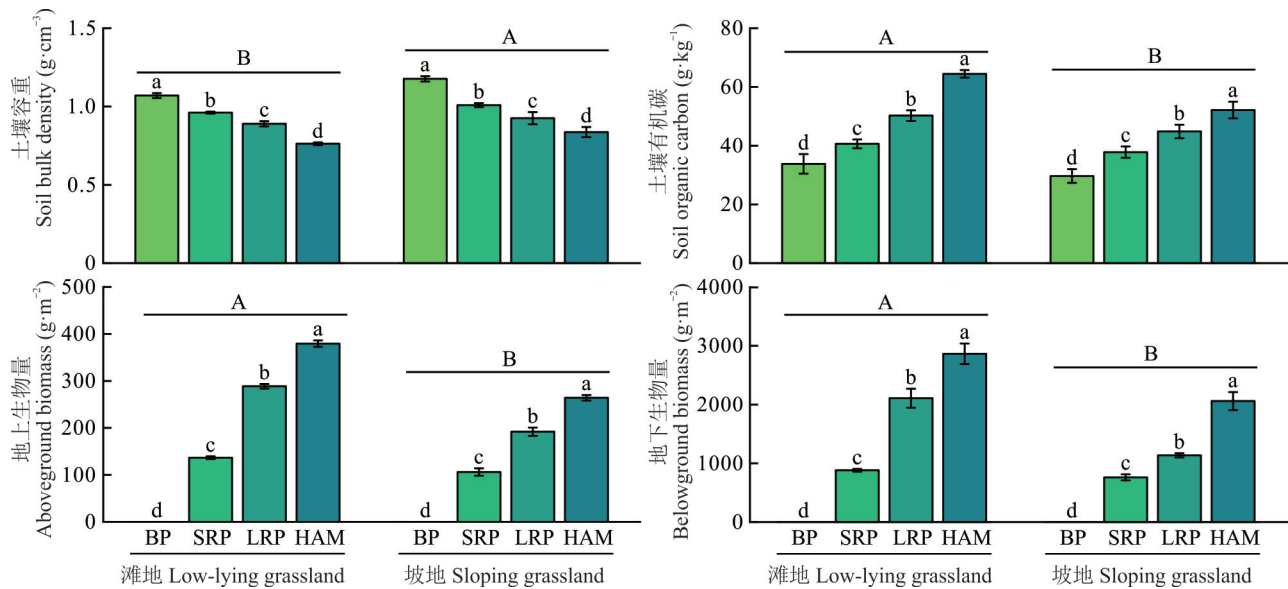


图 2 滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤容重、有机碳和地上、地下生物量的变化

Fig. 2 Variations of soil bulk density, organic carbon, aboveground and underground biomass of low-lying and sloping grasslands at different recovery succession stages

不同小写字母表示不同恢复演替阶段差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示不同立地条件间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。Different lowercase letters indicated significant differences among different restoration succession stages ( $P < 0.05$ ), and different uppercase letters indicated significant differences between different site conditions ( $P < 0.05$ ). The same below.

### 2.2 滩地和坡地土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度的变化特征

土壤孔隙度包括毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度,随着斑块化退化高寒草甸的恢复演替,滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤孔隙度均有差异(图 3)。其中,滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤毛管孔隙度均表现为  $BP < SRP < LRP < HAM$ ,且不同恢复演替阶段之间差异显著,滩地最大为 59.71%,坡地最大为 55.43%;土壤非毛管孔隙度从 BP 阶段到 HAM 阶段均表现为显著降低的趋势,滩地分别为 11.30%、9.37%、6.61%、5.05%,坡地分别为 14.11%、11.24%、8.56%、6.09%;土壤总孔隙度从 BP 阶段到 HAM 阶段均表现为增加的趋势,均在

HAM 阶段达到最大值, 滩地最大为 64.75%, 坡地最大为 61.52%。总之, 滩地和坡地土壤毛细孔隙度和总孔隙度均随自然恢复演替阶段的进程逐渐增加, 而土壤非毛细孔隙度逐渐降低, 土壤毛细孔隙度和总孔隙度表现为滩地高于坡地, 土壤非毛细孔隙度表现为滩地显著低于坡地。

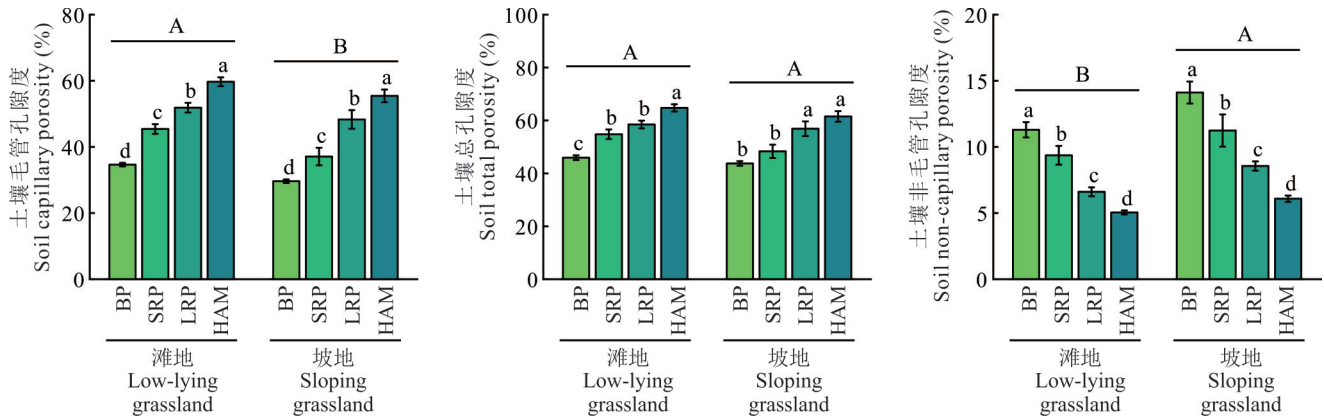


图 3 滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤孔隙度的变化

Fig. 3 Changes in soil porosity of low-lying and sloping grasslands at different recovery succession stages

### 2.3 滩地和坡地土壤饱和持水量、毛细持水量、田间持水量的变化特征

土壤持水能力可以通过土壤饱和持水量、毛细持水量以及田间持水量来体现, 随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替, 滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤持水能力逐渐增加, 且具有显著差异(图 4)。滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤饱和持水量均表现为 BP < SRP < LRP < HAM, 且不同恢复演替阶段之间差异显著, 滩地最大为 88.03%, 坡地最大为 70.09%; 土壤毛细持水量从 BP 阶段到 HAM 阶段均表现为显著增加的趋势, 滩地分别为 35.59%、46.82%、57.44%、81.49%, 而坡地分别为 28.49%、44.89%、53.43%、62.05%; 土壤田间持水量在不同恢复演替阶段之间差异显著, 均表现为 BP < SRP < LRP < HAM, 滩地最大为 39.20%, 坡地最大为 33.82%。总的来说, 斑块化退化高寒草甸在恢复演替过程中, 滩地和坡地土壤饱和持水量、毛细持水量、田间持水量均表现为滩地显著高于坡地。

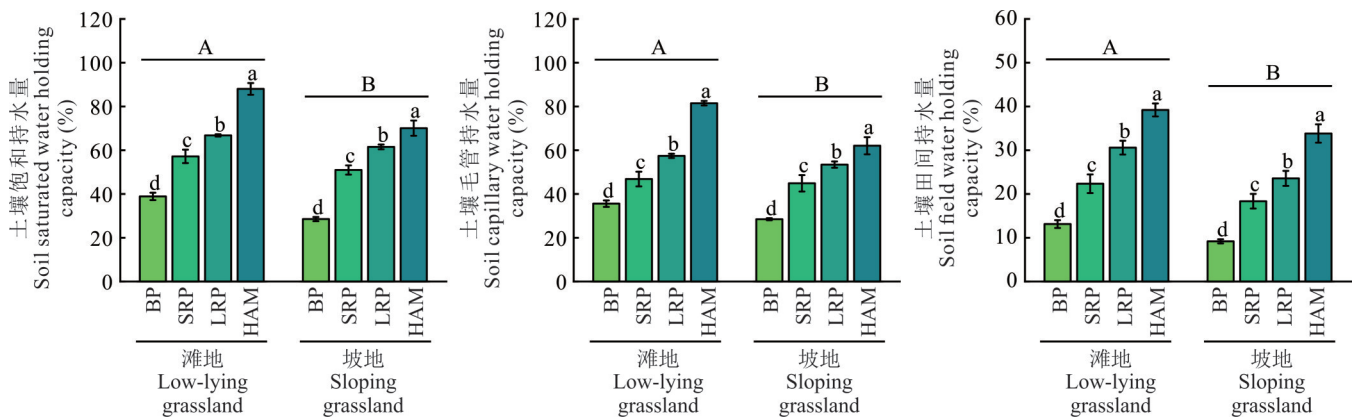


图 4 滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤持水量的变化

Fig. 4 Changes in soil water holding capacity of low-lying and sloping grasslands at different recovery succession stages

### 2.4 滩地和坡地土壤持水能力与土壤孔隙度、容重、有机碳和地上、地下生物量的相关关系

随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替, 不同阶段土壤饱和持水量、毛细持水量、田间持水量、容重、毛细孔隙度、非毛细孔隙度、总孔隙度、有机碳以及地上、地下生物量均有差异, 为了探究其相关关系, 对滩地和坡地各

指标进行组内、组间相关性分析。滩地和坡地组内相关性分析结果表明,土壤容重与土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度、地上和地下生物量分别呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),与非毛管孔隙度呈显著正相关关系( $P<0.05$ );土壤有机碳与土壤毛管孔隙度、总孔隙度和地上、地下生物量均呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),与非毛管孔隙度呈显著负相关关系( $P<0.05$ );地上生物量与土壤毛管孔隙度、总孔隙度和地下生物量呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),与非毛管孔隙度呈显著负相关关系( $P<0.05$ );地下生物量与毛管孔隙度和总孔隙度均呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),与非毛管孔隙度呈显著负相关关系( $P<0.05$ );土壤毛管孔隙度与总孔隙度呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),与非毛管孔隙度呈显著负相关关系( $P<0.05$ );非毛管孔隙度与总孔隙度呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),图5A, B)。滩地和坡地组间相关性分析结果表明,土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别与土壤容重和非毛管孔隙度呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),与土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度和地上、地下生物量分别呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),图6A, B)。

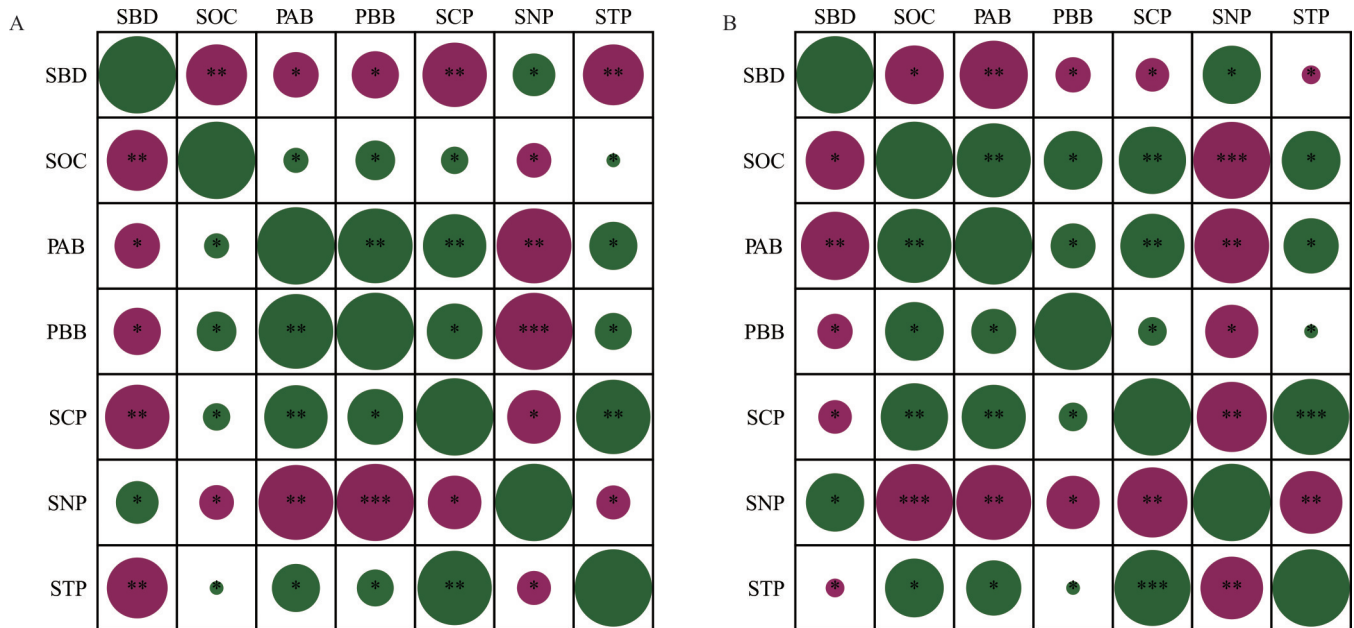


图5 斑块化退化高寒草甸在恢复演替过程中土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、容重、有机碳和地上、地下生物量的组内相关性

Fig. 5 Intra-group correlation of soil capillary porosity, noncapillary porosity, total porosity, bulk density, organic carbon and aboveground and underground biomass in the patchily degraded alpine meadow during recovery succession

A: 滩地 Low-lying grassland; B: 坡地 Sloping grassland; SBD: 土壤容重 Soil bulk density; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; PAB: 植物地上生物量 Plant aboveground biomass; PBB: 植物地下生物量 Plant belowground biomass; SCP: 土壤毛管孔隙度 Soil capillary porosity; SNP: 土壤非毛管孔隙度 Soil non-capillary porosity; STP: 土壤总孔隙度 Soil total porosity; 绿色代表正相关关系 Green represents a positive correlation; 紫色代表负相关关系 Purple represents a negative correlation; \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; \*\*\*:  $P<0.001$ ; 下同 The same below.

### 3 讨论

#### 3.1 滩地和坡地土壤持水能力、孔隙度、容重、有机碳和地上、地下生物量的变化特征

土壤饱和持水量是指当土壤所有孔隙都充满水时土壤中能够保持的全部水分,毛管持水量是指地下水随毛管上升时在土壤毛管力的作用下保持在土壤中的最大含水量,田间持水量是指在不受地下水影响的条件下土壤能够保持悬着水的最大量,因此,三者可从不同角度来表征土壤的持水能力<sup>[4]</sup>。在本研究中,随着斑块化退化高寒草甸的恢复演替,滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量从BP阶段到HAM阶段均表现为增加的趋势,表明裸露斑块的恢复演替促进了土壤持水能力的提高,这与Duan等<sup>[30]</sup>的研究结果具有一致性。这主要是由于退化草甸植被的自然恢复能够显著改善土壤结构状况,增加土壤水分入渗速率,从

A	SSWHC	SCWHC	SFWHC	B	SSWHC	SCWHC	SFWHC
SBD	***	*	**	SBD	**	***	*
SOC	*	**	*	SOC	*	*	**
PAB	*	*	**	PAB	*	**	*
PBB	*	*	**	PBB	*	*	***
SCP	**	*	**	SCP	*	*	*
SNP	*	*	**	SNP	*	*	**
STP	**	*	**	STP	*	*	*

图 6 斑块化退化高寒草甸在恢复演替过程中土壤持水能力与土壤孔隙度、容重、有机碳和地上、地下生物量的组间相关性

**Fig. 6 Inter-group correlation between soil water holding capacity and soil porosity, bulk density, organic carbon, aboveground and underground biomass in the patchily degraded alpine meadow during recovery succession**

SSWHC: 土壤饱和持水量 Soil saturated water holding capacity; SCWHC: 土壤毛管持水量 Soil capillary water holding capacity; SFWHC: 土壤田间持水量 Soil field water holding capacity.

而提高土壤的持水和蓄水能力<sup>[31]</sup>;另外,地表枯落物不断增加,因其本身具有较大的比表面积和结构疏松的特性,有利于对降水进行截留和分配,并且可以吸收大量水分,具有很强的水源涵养和蓄水保土作用<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,滩地不同恢复演替阶段土壤饱和持水量、毛管持水量以及田间持水量均高于坡地,这与梁秦杨等<sup>[33]</sup>的研究结果类似。出现这种差异的原因是植被恢复可能通过改变降水、气温等影响土壤水的蒸发与补给,并通过影响近地表气温、风速改变土壤水分的蒸发,由于坡地的光照强度和太阳辐射较强,通风条件良好,水分蒸发量较大,加之地表径流和雨水冲刷的作用,从而导致土壤持水能力降低<sup>[34-35]</sup>。

土壤孔隙度可分为毛管孔隙度和非毛管孔隙度,通常 $<0.1$  mm 的孔隙为毛管孔隙度,可以借助毛管力的作用将水分长时间的保持在土壤中,用于植物根系的吸收和土壤水分的蒸发,起着土壤保水的作用,而通常 $>0.1$  mm 的孔隙为非毛管孔隙度,可以吸纳大气降水并渗透到土壤深层,起着涵养水源的作用<sup>[36-37]</sup>。本研究结果表明,随着裸露斑块自然恢复演替的进行,滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤毛管孔隙度和总孔隙度均表现为逐渐增加的趋势,而非毛管孔隙度表现为逐渐减少的趋势,这与 Duan 等<sup>[14,30]</sup>的研究结果趋同。这可能是因为植物根系数量和活力不断增加,土壤变疏松,另外退化草甸植物盖度的提高增加了植物对降尘和细颗粒的截留,土壤中粉粒和黏粒的比例升高,导致非毛管孔隙度增加,丰富的植物根系构型增大了毛管孔隙度<sup>[38]</sup>。本研究结果表明,滩地不同恢复演替阶段土壤毛管孔隙度、总孔隙度均高于坡地,而非毛管孔隙度低于坡地。这可能与滩地和坡地的土壤发育状况、土壤表层的凋落物组成、优势种定植程度、地下根系的生长发育状况以及凋落物的分解状况等有关。

土壤容重是指单位体积原状土壤的重量,可以反映土壤结构状况与土壤的松紧程度,用于评价土壤的水源涵养能力<sup>[39]</sup>。在本研究中,随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤容重从 BP 阶段到 HAM 阶段表现为逐渐减少的趋势,这与段成伟<sup>[40]</sup>的研究结果类似。主要是因为退化草甸植物群落逐渐恢复,植被覆盖度增加,根系的生长和盖度增加以及土壤中植物枯枝落叶的积累,使得土壤疏松多孔,进一步导致土壤容重降低<sup>[41]</sup>。滩地土壤容重低于坡地。原因可能是坡地植物群落种类较少,群落盖度较低,导致土壤腐殖质层厚度较低,受高原鼠兔和放牧干扰影响程度强于滩地,导致土壤紧实度增加,另外,坡地石砾含量较多,因此土壤容重表现为滩地低于坡地。

土壤有机碳是土壤有机质的主要构成元素,不仅可以提高土壤结构的稳定性,从而提高草甸土壤的持水性、供水性及导水性能,还可以提高土壤墒情,增强其抗冲刷的能力,减少土壤养分的流失,从而促进植被的生长和发育<sup>[42]</sup>。研究表明,在斑块化退化高寒草甸的恢复演替过程中,滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤有机碳表现

为增加的趋势,此与Chen等<sup>[12]</sup>的研究结果具有一致性。土壤中的有机碳量是由进入土壤中的植物残体量和在土壤微生物作用下分解的动植物残体量之和,随着退化草甸植被的恢复,植被枯落物质量和类型不断增加,使土壤中分解物和分解者含量提高,从而促使土壤有机碳不断积累<sup>[43-44]</sup>。在本研究中,滩地土壤有机碳高于坡地,此与李威等<sup>[45]</sup>的研究结果类似。主要是因为坡地径流(地表径流和壤中流)对坡地土壤有机碳的冲刷与运移,从而造成土壤有机碳随水分的迁移而流失<sup>[46]</sup>。

高寒草甸植物地上部分对降水具有拦截、蓄积作用,对风力侵蚀也有抵抗作用,而植物地下根系可固结土壤,增加土壤入渗<sup>[47]</sup>。研究表明,在高寒草甸裸露斑块的恢复演替过程中,滩地和坡地不同恢复演替阶段植物地上和地下生物量均逐渐增加,这与Duan等<sup>[14]</sup>的研究结果趋同。这主要是因为斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替过程中,土壤水分和土壤养分得到一定程度的补充,植被物种丰富度、均匀度、优势度以及多样性指数逐渐增加,植被盖度和高度逐步升高,从而导致地上植被部分和土壤中根系的数量逐渐增加,根系通过形成菌丝和复杂的根系网络来促进土壤稳定,从而增强土壤聚集性,更密集的根系网络与更大的土壤保持能力有关<sup>[48]</sup>。本研究表明,滩地地上和地下生物量均高于坡地。这可能是因为滩地和坡地植被定植程度不同,坡地水土侵蚀较为严重,土壤结构稳定性差、保肥保水难,不利于禾本科植物和莎草科植物生长,而滩地则相反,植物可以获得更多的水分和养分,从而占据相对较充分的空间和资源,有利于其生长发育。

### 3.2 滩地和坡地土壤持水能力与土壤孔隙度、容重、有机碳和地上、地下生物量的相关关系

土壤持水量的变化在小尺度上主要受到土壤、地形和植被因子的影响,与土壤容重、孔隙度、有机碳含量、土壤表面植被覆盖度和根系生长量及分布状况有关<sup>[2,49]</sup>。本研究相关分析结果表明,斑块化退化高寒草甸在恢复演替过程中,滩地和坡地土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别与土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度以及植物地上和地下生物量呈显著正相关关系,而分别与土壤容重和非毛管孔隙度呈显著负相关关系,这与宋成刚等<sup>[38]</sup>和吴启华等<sup>[50]</sup>的研究结果类似;另外,滩地和坡地土壤容重与非毛管孔隙度呈显著正相关关系,其两者分别与土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度以及植物地上和地下生物量呈显著负相关关系,而土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度以及植物地上和地下生物量两两之间分别呈显著正相关关系,此与张铭洋等<sup>[51]</sup>的研究具有一致性。出现这种情况的原因可能是随着高寒草甸地下根系生物量的增加,促进高寒草甸土壤更多的细根分布,而细根代谢产生的有机物质有利于土壤颗粒的胶结和土壤毛管孔隙度的形成,促进了土壤微生物的生长发育,土壤微生物通过缠绕作用和分泌物的胶结作用,进一步提高土壤有机质的输入,增加土壤颗粒对水分的吸附,降低土壤水分向深层下渗,从而增加土壤持水量<sup>[15]</sup>;此外,土壤有机碳含量的提高可使土壤中的动物数量增加,而动物在土壤中的活动可使土壤粉粒含量升高、容重减小、毛管孔隙度增加,进而改善土壤结构,并相应提高土壤的持水能力<sup>[52]</sup>。因此,在斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替过程中,滩地和坡地土壤持水能力受土壤容重、有机碳、植物地上和地下生物量多种因素的共同作用,地上部分对自然降水具有拦截、蓄积作用,根系是植物与土壤直接接触的器官,能够减轻土壤的压实程度,提高土壤孔隙度,降低土壤容重,改善土壤通透性,进入土壤中的水分主要是由土粒对水的吸附力和土壤毛管力所保持,故土壤表面积和土壤孔隙直接决定了土壤水分的保持,而土壤容重、有机碳含量等土壤理化性质主要通过影响孔隙状况和比表面积从而影响土壤的持水能力<sup>[53-54]</sup>。

### 3.3 滩地和坡地高寒草甸土壤水分相关指标异质性的规律分析

自然降水是土壤水分的最直接来源,降水量会直接影响土壤水分含量与动态变化<sup>[55]</sup>。坡地径流流速较快,挟沙能力强,较小颗粒可能会堵塞孔隙,降低土壤水分下渗能力,导致壤中流流量减少,而滩地流速较慢,有利于土壤水分下渗,壤中流产流时间提前,流量增大<sup>[56]</sup>,因此,坡地裸露斑块更容易造成水土侵蚀。滩地和坡地土壤水分与养分的流动方向存在差异,故直接影响土壤的水肥供给,使植物幼苗的定植与生长及成苗的拓展与繁殖等过程获取生境资源的难易程度不同,导致滩地和坡地植物遭受干旱、贫瘠等胁迫的强度与频度不同,最终影响重建植物群落的特征与演替方向<sup>[45]</sup>。因此,在长期恢复演替进程中,滩地和坡地的植物群落优势种不同。此外,在同一自然环境和气候条件下,不同立地条件改变了光照、温度、水分、养分等生态因子,成为影响植被分布的主要因子,进而对植被的分布和特征产生重要影响<sup>[57]</sup>。滩地的植被接受光照更充足,生长良好,根系对土壤的固结能力更

强,物质循环与能量流动更快,能更有效地提高土体稳定性和养分含量<sup>[58]</sup>。地形是影响风速的重要因素之一,滩地与坡地的极值风速高度大致相同,但滩地地形对应风速极值明显大于坡地<sup>[59]</sup>。坡地土层浅薄易侵蚀,地表植被覆盖度低,植被—土壤协调状况较差,故恰当的管理措施能改善坡地植被与土壤的恢复条件,增强坡面生境抗高原鼠兔和放牧干扰能力,从而提高植被—土壤系统的耦合度<sup>[60]</sup>。

高原鼠兔具有典型的社会性,多栖息在土壤较为疏松的坡地和河谷高原地带,喜栖居于植被低矮的开阔生境,高原鼠兔防控后二次发生现象较为普遍<sup>[61]</sup>。当载畜量超过草地承载阈值后,草地植物高度、盖度降低,杂类草增多,使草地更适于鼠类栖息,进而使鼠类种群密度急剧增加,裸露地表、疏松的表土层在强地表径流和风力的影响下,水土流失严重,进一步降低草地生态系统的抵抗力和恢复力,最终导致草地出现二次退化<sup>[62]</sup>。一般来说,斑块化退化的高寒草甸总是受到放牧和高原鼠兔干扰的影响,导致草甸中出现不同类型的斑块<sup>[63]</sup>。有研究表明,在无高原鼠兔干扰下,裸露斑块首先形成土壤物理结皮,然后形成苔藓生物结皮,进一步演替为杂类草,杂类草进一步演替为禾草类植物,禾草类植物最终演替为典型的高寒草甸,从裸露斑块恢复演替到健康高寒草甸至少需要 15~20 年<sup>[40,64]</sup>。因此,退化斑块的天然恢复演替是一个漫长的过程。目前,为了黄河源区斑块化退化高寒草甸的生态恢复,许多学者实施了大量的人工干预措施,比如长期围栏封育<sup>[65]</sup>、施肥和补播<sup>[66]</sup>等,从而加快斑块化退化高寒草甸的恢复演替。然而,现有的恢复措施没有考虑地形和水热条件的影响,导致恢复的生态系统存在不稳定性,从而使恢复植被发生二次退化,这可能是由于对斑块化退化高寒草甸恢复演替过程中的关键限制因子认识不清<sup>[67]</sup>。本研究发现,滩地和坡地不同恢复演替阶段土壤容重、孔隙度、有机碳以及植物地上和地下生物量一系列要素有明显的变化,而这些要素直接影响土壤的持水能力。另外,随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,滩地和坡地草甸植被生长状况和地表覆盖度发生改变,故土壤容重、孔隙度、有机碳等要素也发生了变化,从而改变了土壤的水源涵养能力,不同恢复演替阶段土壤特性不同,其持水能力也不尽相同。因此,为了加快斑块化退化高寒草甸植被、土壤养分以及水源涵养的恢复,可以采取施肥、免耕补播、覆盖无纺布、镇压等措施。本研究的不足之处在于没有进行围栏封育和控鼠,因为退化斑块在自然恢复演替过程中受到频繁的扰动,会导致高寒草甸的自然恢复演替时间延长甚至无法进行。另外,本研究只是探讨了滩地和坡地土壤容重、孔隙度(毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度)、有机碳和生物量(地上和地下)对土壤持水能力的影响,未来对斑块化退化高寒草甸在自然恢复演替过程中土壤持水能力的研究需考虑围栏封育和控鼠措施,从土壤水分渗透性、土壤团聚体和聚集性、植物根系分布状况以及枯落物等多角度进行研究。

#### 4 结论

随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,1)滩地和坡地的土壤持水能力显著提高,裸露斑块和短期恢复斑块与长期恢复斑块和健康高寒草甸之间的土壤持水能力存在显著性差异,这说明裸露斑块和短期恢复斑块还未达到健康草甸生态修复的目的,其生态系统韧性不足,在不合理的放牧利用下容易发生二次退化;2)滩地和坡地土壤持水能力受土壤孔隙度、容重、有机碳以及植物地上和地下根系生物量多种因素的共同制约,与土壤有机碳、毛管孔隙度、总孔隙度以及植物地上和地下生物量均呈显著正相关关系,而与土壤容重和非毛管孔隙度均呈显著负相关关系;3)滩地土壤持水能力显著高于坡地,说明滩地更有利于退化高寒草甸的自然演替和生态修复。

#### 参考文献 References:

- [1] Zhao J M, Zhang D G, Liu C Z. The effect of land use patterns on soil moisture retention capacity and soil infiltration property in eastern Qilian mountains. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(3): 422—429.  
赵锦梅, 张德罡, 刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 422—429.
- [2] Wang Z W, Huang L M, Shao M A, *et al.* Soil water holding capacity under different land use patterns in the Qinghai alpine region. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1722—1730.  
王紫薇, 黄来明, 邵明安, 等. 青海高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力及影响因素. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1722—1730.
- [3] Liu Y, Gao M S, Wu W, *et al.* The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated

- apple orchard in the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 7–12.
- [4] Sun Y, Yang Y S, He Q, *et al.* Responses of soil water conservation function and soil physicochemical properties to a range of degradation conditions in alpine meadows of the Three River Headwater Region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 16–29.  
孙玉, 杨永胜, 何琦, 等. 三江源高寒草甸水源涵养功能及土壤理化性质对退化程度的响应. *草业学报*, 2023, 32(6): 16–29.
- [5] Gao Z Y, Lin Z J, Niu F J, *et al.* Soil water dynamics in the active layers under different land-cover types in the permafrost regions of the Qinghai–Tibet Plateau, China. *Geoderma*, 2020, 364: 114176.
- [6] Zhang Y W, Wang K B, Wang J, *et al.* Changes in soil water holding capacity and water availability following vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9692.
- [7] Li Y X, Yu M, Cao G C. Research on soil physical properties and water holding capacity of lands with different use type in the southern slope of Qilian mountains. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(2): 191–197.  
李银霞, 虞敏, 曹广超. 祁连山南坡不同土地利用类型土壤物理特性及其持水能力研究. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 191–197.
- [8] Duan C W, Li X L, Li C Y, *et al.* Formation mechanism of alpine meadow bare patches and key factors limiting their restoration in the Source Zone of the Yellow River. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16): 6952–6964.  
段成伟, 李希来, 李成一, 等. 黄河源区高寒草甸裸露斑块形成机理与生态修复关键限制因子. *生态学报*, 2024, 44(16): 6952–6964.
- [9] Qin L P, Luo T X, Feng Z L, *et al.* Study on soil water capacity change of natural steppe with different utilization methods. *China Herbivore Science*, 2023, 43(5): 66–69.  
秦丽萍, 罗天旭, 冯兆林, 等. 不同利用方式天然草原土壤涵水能力变化研究. *中国草食动物科学*, 2023, 43(5): 66–69.
- [10] Zhu J B, He H D, Li H Q, *et al.* Characteristics of soil bulk density and soil water-holding capacity in alpine meadow under grazing gradients. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 66–71.  
祝景彬, 贺慧丹, 李红琴, 等. 牧压梯度下高寒草甸土壤容重及持水能力的变化特征. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 66–71.
- [11] Li H Q, Wu X L, Zhang F W, *et al.* The response of soil water holding capacity of alpine meadow in winter pasture to enclosure. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(8): 1–8.  
李红琴, 吴夏璐, 张法伟, 等. 高寒草甸冬季牧场土壤持水能力对草地封育的响应. *中国草地学报*, 2021, 43(8): 1–8.
- [12] Chen G R, Hu J, Li C Y, *et al.* Repercussions of recovering patchy alpine meadows on soil nematode communities in the meadow ecosystems of the Yellow River source region, west China. *Global Ecology and Conservation*, 2025: e03565.
- [13] Wang Y M, Li G R, Li X L, *et al.* Spatial heterogeneity of alpine meadow patchiness and its topographic factor influence. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(2): 570–578.  
王祎明, 李国荣, 李希来, 等. 高寒草甸斑块化空间分异性及其地形因子影响. *草地学报*, 2024, 32(2): 570–578.
- [14] Duan C W, Li X L, Li C Y, *et al.* Positive effects of fungal  $\beta$  diversity on soil multifunctionality mediated by pH in the natural restoration succession stages of alpine meadow patches. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110122.
- [15] Yang S W, Zhang D G, Niu Y J, *et al.* Effect of short-term grazing on surface soil infiltration and soil water retention in alpine meadow. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 96–101.  
杨思维, 张德罡, 牛钰杰, 等. 短期放牧对高寒草甸表层土壤入渗和水分保持能力的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 96–101.
- [16] Ma H X, Zhang D G, Chen J, *et al.* Change in factors influencing soil water holding capacity at microsites along a slope transect in alpine meadow in the eastern Qilian mountains. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 28–37.  
马海霞, 张德罡, 陈瑾, 等. 祁连山东段高寒草甸土壤持水能力在小尺度不同坡面位置的分异特征. *草业学报*, 2020, 29(1): 28–37.
- [17] Yang Y S, Zhang L, Wei Y X, *et al.* Effects of degradation degree on soil physicochemical properties and soil water-holding capacity in Zeku alpine meadow in the Headwater Region of Three Rivers in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5): 54–61.  
杨永胜, 张莉, 未亚西, 等. 退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 54–61.
- [18] Fan Y J, Hou X Y, Zhao D P, *et al.* Preliminary study on soil water-holding capacity along degradation gradients of alpine

- meadow. *Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition)*, 2019, 45(1): 10–15.
- 范月君, 侯向阳, 赵得萍, 等. 不同退化演替阶段高寒草甸表层土壤持水特性的初步研究. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(1): 10–15.
- [19] Ning L, Yao Z Y, Gao T M, *et al.* The influence of different slope positions on the characteristics of desert grassland plant communities. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(1): 15–22.
- 宁璐, 要振宇, 高天明, 等. 不同坡位对荒漠草原植物群落特征的影响. *东北林业大学学报*, 2025, 53(1): 15–22.
- [20] Ning L. Effects of different slope positions on community characteristics and functional traits of dominant plants in desert steppe. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- 宁璐. 不同坡位对荒漠草原群落特征及优势植物功能性状的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [21] Yang P N, Li X L, Li C Y, *et al.* Response of soil microbial diversity to long-term enclosure in degraded patches of alpine meadow in the Source Zone of the Yellow River. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2293–2303.
- 杨鹏年, 李希来, 李成一, 等. 黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应. *环境科学*, 2023, 44(4): 2293–2303.
- [22] Song Z H, Li X L, Li J X, *et al.* Response of snowmelt patches on alpine meadow to grassland mowing and pika density. *Grassland and Turf*, 2020, 40(5): 15–22.
- 宋梓涵, 李希来, 李杰霞, 等. 高寒草甸融雪斑块对植物刈割强度和高原鼠兔密度的响应. *草原与草坪*, 2020, 40(5): 15–22.
- [23] Gao P, Li X L, Chai Y, *et al.* Effects of sheep plate manure and bacterial fertilizer on the soil nutrient and enzyme activity of degenerate alpine meadow. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(11): 29–36.
- 高佩, 李希来, 柴瑜, 等. 羊板粪与枯草芽孢杆菌配施对退化高寒草甸土壤养分及酶活性的影响. *中国土壤与肥料*, 2024(11): 29–36.
- [24] Su X X, Li X L, Sun H F, *et al.* Effects of plateau pika and mowing disturbances on plant community and soil physical and chemical properties in alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22): 10189–10199.
- 苏晓雪, 李希来, 孙华方, 等. 高原鼠兔和刈割扰动对高寒草甸植物群落和土壤特征的影响. *生态学报*, 2024, 44(22): 10189–10199.
- [25] Song Z H, Li X L, Li J X, *et al.* Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) trails on enlargement and connection of degraded patches in alpine meadow. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(10): 3276–3284.
- 宋梓涵, 李希来, 李杰霞, 等. 高原鼠兔跑道对高寒草甸退化斑块扩大与连通的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(10): 3276–3284.
- [26] Chai Y, Li X L, Ma P P, *et al.* Effects of fertilization and rodent control on plant soil and microorganism carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics in degraded alpine meadows. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(1): 12–22.
- 柴瑜, 李希来, 马盼盼, 等. 施肥和控鼠对退化高寒草甸植物—土壤—微生物碳氮磷化学计量特征的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(1): 12–22.
- [27] Li Q, He G X, Wen T, *et al.* Response of soil physical and chemical properties to altitude and aspect of alpine meadow in the eastern Qilian Mountains and their relationships with vegetation characteristics. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5): 1559–1569.
- 李强, 何国兴, 文铜, 等. 东祁连山高寒草甸土壤理化性质对海拔和坡向的响应及其与植被特征的关系. *干旱区地理*, 2022, 45(5): 1559–1569.
- [28] Lamaocao. A study on limiting factors for vegetation restoration in the bald patch damaged by plateau pika and evaluation of vegetation restoration measures in alpine meadow. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- 拉毛草. 高寒草甸鼠害型秃斑植被恢复限制因子分析及恢复措施评价. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- [29] Bao S D. Soil agrochemical analysis (the third edition). Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000.
- 鲍士旦. 土壤农化分析(3版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] Duan C W, Li X L, Li C Y, *et al.* Analysis on the soil physical, chemical, and microbial community properties of different alpine meadow patches in the Source Zone of the Yellow River, west China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109531.
- [31] Feng Z Q, Sun W Y, Mu X M, *et al.* Effects of vegetation restoration methods on soil moisture in the small basins of Loess Plateau gully region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(4): 1–10.
- 凤紫棋, 孙文义, 穆兴民, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复方式对小流域土壤水分的影响. *中国水土保持科学*, 2023, 21(4): 1–10.

- [32] Zhang H, Mu X M, Gao P. Variation of litter accumulation and water holding capacity at different site conditions in the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 45–52.  
张缓, 穆兴民, 高鹏. 黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 45–52.
- [33] Liang Q Y, Fu D X, Zhan J M, *et al.* Effects of terrain on soil hydrological characteristics of alpine grasslands. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(4): 367–375.  
梁秦杨, 付殿霞, 赵锦梅, 等. 地形对高寒草地土壤水文特征的影响. *森林与环境学报*, 2024, 44(4): 367–375.
- [34] Sun Z Y. Effects of vegetation restoration on soil moisture on slopes in Karst area and its influencing factors. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.  
孙智妍. 喀斯特坡地植被恢复的土壤水分效应及其影响因素研究. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [35] Zhang X, Liu M X, Chen X J, *et al.* Species coexistence mechanism of plant communities on different slopes of Gannan sub-alpine meadows. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6): 2582–2594.  
张鑫, 刘旻霞, 陈雪娇, 等. 甘南亚高寒草甸不同坡位植物群落物种共存机制. *生态学报*, 2025, 45(6): 2582–2594.
- [36] Zeng Z Q, Tian Y X, Deng Y H, *et al.* The runoff and soil water storage of different restoration patterns. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2016, 43(4): 81–85.  
曾掌权, 田育新, 邓鹰鸿, 等. 不同植被恢复模式地表径流与土壤贮水能力研究. *湖南林业科技*, 2016, 43(4): 81–85.
- [37] Zhong Z L. Study on soil water characteristics of different plant communities in subalpine meadows of Wugong mountain. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.  
钟支亮. 武功山山地草甸不同植物群落土壤水分特征研究. 南昌: 江西农业大学, 2017.
- [38] Song C G, Zhang M Y, He Q, *et al.* Effects of grazing prohibition on vegetation community structure and soil moisture characteristics of alpine meadows on the Southern slope of the Qilian mountains. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(4): 22–32.  
宋成刚, 张铭洋, 何琦, 等. 禁牧封育对祁连山南麓高寒草甸植被群落结构及土壤水分特征的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(4): 22–32.
- [39] Zhang Y H, Zhang L, Zhang X J, *et al.* Effects of degradation degree on plant communities and soil water holding capacity of Maqin alpine meadow. *Pratacultural Science*, 2022, 39(2): 235–246.  
张宇恒, 张莉, 张秀娟, 等. 退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响. *草业科学*, 2022, 39(2): 235–246.
- [40] Duan C W. Study on mechanisms of alpine meadow patchy degradation and its restoration in the Source Zone of the Yellow River. Xining: Qinghai University, 2023.  
段成伟. 黄河源区高寒草甸斑块化退化机理与其恢复研究. 西宁: 青海大学, 2023.
- [41] Shui W, Bai J P, Jian X M, *et al.* Changes in water conservation and soil physicochemical properties during the recovery of decertified grassland in Zoigê, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 277–285.  
税伟, 白剑平, 简小枚, 等. 若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能. *生态学报*, 2017, 37(1): 277–285.
- [42] Yang Y H, Wu J C, Zhao S W, *et al.* Comparison of soil water-holding and water-supplying ability of the different grassland in Loess Hilly region. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1010–1013.  
杨永辉, 武继承, 赵世伟, 等. 黄土丘陵沟壑区草地土壤持水、供水性能比较. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1010–1013.
- [43] Li L, He H D, Wei Y X, *et al.* Response of vegetation community structure, soil carbon sequestration, and water-holding capacity in returning farmland to grassland plots, in the agro-pastoral transitional zone in the Three Rivers Source Region. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 1999–2008.  
李令, 贺慧丹, 未亚西, 等. 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳持水能力对退耕还草措施的响应. *草业科学*, 2017, 34(10): 1999–2008.
- [44] Yang Y S, Li H Q, Zhang L, *et al.* Effects of fencing measurement on vegetation community structure and soil water-holding capacity in Batang alpine meadow. *Mountain Research*, 2016, 34(5): 606–614.  
杨永胜, 李红琴, 张莉, 等. 封育措施对巴塘高寒草甸植被群落结构及土壤持水能力的影响. *山地学报*, 2016, 34(5): 606–614.
- [45] Li W, Liu J P, Chen J, *et al.* Slope position effect on vegetation recovery and soil characteristics in an alpine meadow hill section. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(3): 110–117.  
李威, 刘金平, 陈俊, 等. 坡位对高寒草甸山体断面重建植被及土壤性状的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(3): 110–117.
- [46] Pan R R, Li X Y, Hu G R, *et al.* Characteristics of soil organic carbon distribution and its controlling factors on hillslope in

- seasonal frozen area of Qinghai Lake Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6374–6384.
- 潘蕊蕊, 李小雁, 胡广荣, 等. 青海湖流域季节性冻土区坡面土壤有机碳分布特征及其影响因素. *生态学报*, 2020, 40(18): 6374–6384.
- [47] Ma S J, Zhou J W, Wang F C, *et al.* Effect of soil erosion of plateau zokor new mound in alpine meadow. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 58–63, 71.  
马素洁, 周建伟, 王福成, 等. 高寒草甸区高原鼯鼠新生土丘水土流失特征. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 58–63, 71.
- [48] Du J J, Wei P J, Bahadur A, *et al.* The impacts of revegetation on ecosystem services in the extremely degraded alpine grassland of permafrost regions. *Sustainability*, 2025, 17(4): 1512.
- [49] He H D, Li H Q, Zhu J B, *et al.* Soil water holding capacity under the condition of fencing in alpine meadow of the Source Region of Yellow River. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5): 62–67.  
贺慧丹, 李红琴, 祝景彬, 等. 黄河源高寒草甸封育条件下的土壤持水能力. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 62–67.
- [50] Wu Q H, Mao S J, Liu X Q, *et al.* Analysis of the soil water-holding capacity in alpine forb meadow under grazing gradient and relevant influence factors. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 590–598.  
吴启华, 毛绍娟, 刘晓琴, 等. 牧压梯度下高寒杂草类草甸土壤持水能力及影响因素分析. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 590–598.
- [51] Zhang M Y, Li X J, Yang Y S, *et al.* Effects of forbidden grazing and enclosure on vegetation community structure and soil moisture characteristics in alpine meadow of the Yellow River Source. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(7): 1185–1197.  
张铭洋, 李小娟, 杨永胜, 等. 禁牧封育对黄河源高寒草甸植被群落结构及土壤水分特征的影响. *西北植物学报*, 2023, 43(7): 1185–1197.
- [52] Wang W L, He K N, Zhang T, *et al.* Effects of mechanical components and physical and chemical properties of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai on its saturated hydraulic conductivity and water holding capacity. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(2): 69–77.  
王玮璐, 贺康宁, 张潭, 等. 青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(2): 69–77.
- [53] Yi X S, Li G S, Li K, *et al.* Effect of grassland vegetation degradation on soil water holding capacity in the headwaters area of Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(4): 907–918.  
易湘生, 李国胜, 李阔, 等. 长江源区草地植被退化对土壤持水能力影响. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(4): 907–918.
- [54] Yan S, Xia F, Wei W, *et al.* Differences along an erosion gradient in alpine meadow plant community diversity and factors influencing diversity. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 1–13.  
严双, 夏菲, 魏巍, 等. 高寒草甸不同侵蚀样地植物多样性的差异及其关键影响因子. *草业学报*, 2025, 34(6): 1–13.
- [55] Zhang Y, Hu J, Zhou Q P, *et al.* Effects of shrub removal management measures on soil water conservation function in alpine shrub-encroached grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(6): 1912–1923.  
张怡, 胡健, 周青平, 等. 高寒灌丛化草地灌木去除管理措施对土壤水源涵养功能的影响. *草地学报*, 2025, 33(6): 1912–1923.
- [56] Zhang Y H, Liu C, Fu Z Y, *et al.* Research progress of hydrological process and soil organic carbon migration in slope field. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(3): 730–738.  
张宇恒, 刘春, 付智勇, 等. 坡面水文过程与土壤有机碳迁移研究进展. *土壤通报*, 2023, 54(3): 730–738.
- [57] Ma R, Zhao J M. Relationship between the grassland and soil conditions in the Eastern Qilian mountains. *Arid Zone Research*, 2020, 37(2): 374–381.  
马瑞, 赵锦梅. 东祁连山河谷高寒草地植被群落特征及其与土壤性状的关系. *干旱区研究*, 2020, 37(2): 374–381.
- [58] Sha X W, Wu Y X, Jia G D, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil erodibility and nutrients at different slope sites in Northern Hebei mountains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 11–19, 28.  
沙晓玮, 武昱鑫, 贾国栋, 等. 冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 11–19, 28.
- [59] Wang Z S, Tang Y H, Fang Z Y, *et al.* Numerical simulation of downburst wind field under continuous mountains. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(3): 90–98.  
汪之松, 唐阳红, 方智远, 等. 山脉地形下击暴流风场数值模拟. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(3): 90–98.
- [60] Guo W F, Li X, Chen Y M, *et al.* Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different

- management measures in Taihang mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6170–6181.
- 郭文芳, 李鑫, 陈艳梅, 等. 太行山坡地不同管理措施植被—土壤系统耦合关系. *生态学报*, 2023, 43(15): 6170–6181.
- [61] Sun F D, Gou W L, Zhu C, *et al.* Ranking and parameters for rodents damaged rangelands and adaptive management in Northwest Plateau of Sichuan Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 152–159.
- 孙飞达, 苟文龙, 朱灿, 等. 川西北高原鼠荒地危害程度分级及适应性管理对策. *草地学报*, 2018, 26(1): 152–159.
- [62] Zhou R. The response of individuals and populations in plateau pika (*Ochotona curzoniae*) to predation risk and changes of habitat vegetation communities. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.
- 周睿. 高原鼠兔个体和种群对捕食风险的响应及其栖息地植物群落的变化. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [63] Song Z H, Li X L, Su X X, *et al.* Analyzing the recovery mechanisms of patchy degradation and its response to mowing and plateau pika disturbances in alpine meadow. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110565.
- [64] Song Z H, Li X L, Li J X, *et al.* Characteristics of plant functional groups and root-soil complexes of different disturbed patches in alpine meadow. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 31–38.
- 宋梓涵, 李希来, 李杰霞, 等. 高寒草甸不同扰动斑块植物功能群和根土复合体特征变化研究. *生态科学*, 2022, 41(1): 31–38.
- [65] Yang P N, Li X L, Li C Y, *et al.* Effects of long-term enclosure on main plant functional groups and their biochemical properties in a patchily degraded alpine meadow in the Source Zone of the Yellow River, West China. *Agronomy*, 2023, 13(11): 2781.
- [66] Li X L, Ma Y Q, Duan C W, *et al.* Effects of fertilization and reseeding on biomass and species diversity of patchy degraded alpine meadows with different slope directions. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(5): 1–13.
- 李希来, 马昀峤, 段成伟, 等. 施肥和补播对不同坡向斑块化退化高寒草甸生物量和物种多样性的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(5): 1–13.
- [67] Chai Y, Li X L, Li C Y, *et al.* Soil moisture regulates soil-microbe-enzyme stoichiometries during recovery succession in patchily degraded alpine meadows on the Qinghai–Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 2024, 204: 107287.